温度和寄主密度对雅脊金小蜂寄生和刺死米象幼虫的影响

高 燕[1],张中润[2],许再福[1*]

(1. 华南农业大学资源环境学院,广州 510640;2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所,海南儋州 571737)

摘要:本文通过研究雅脊金小蜂 *Theocolax elegans* 在 6 个不同温度梯度下对米象 *Sitophilus oryzae* 幼虫的寄生和取食能力,评价了雅脊金小蜂对米象的控制效果。雅脊金小蜂寄生米象的功能反应结果表明, 在 17℃ ~ 29℃的温度范围内,寄生蜂的寄主处理时间与温度成反比,从 0.333 天(17℃)到 0.063 天(29℃)。寄主搜索率也随温度变化而变化,17℃时最低(0.083 头/天),26℃时最高(1.521 头/天);当温度升高到 29℃,寄主搜索率略有下降;但当温度升高到 32℃,寄主搜索率明显下降。温度调节的功能反应模型表明,在 26℃ ~ 29℃的温度范围内,寄生率较高。所以,在 26℃ ~ 29℃时,雅脊金小蜂对米象有较好的控制效果。

关键词:雅脊金小蜂;米象;温度;生物防治;功能反应

中图分类号:Q968 **文献标识码**:A **文章编号**:0454-6296(2006)04-0636-07

Effects of temperature and host density on parasitizing and host-feeding of *Theocolax elegans* (Hymenoptera: Pteromalidae) to *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in stored wheat

GAO Yan[1], ZHANG Zhong-Run[2], XU Zai-Fu[1*] (1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: The larval-pupa parasitoid *Theocolax elegans* was evaluated as a biological control agent against the rice weevil, *Sitophilus oryzae*, in stored wheat. The parasitization and host-feeding of the parasitoid at six constant temperatures (17 – 32℃) were determined in the laboratory. The functional response of *T. elegans* parasitizing *S. oryzae* was examined over a range of temperatures and host densities. A functional response equation was fitted to each temperature regime. Within the temperature range of 17℃ to 29℃, the handling time was inversely proportional to temperature, and ranged from 0.333 d at 17℃ to 0.063 d at 29℃. Instantaneous search rate also changed with temperature and was the lowest at 17℃ and highest at 26℃. But over 29℃, the instantaneous search rate decreased significantly as the temperature increased. A temperature-mediated functional response equation was fitted to the data, in which handing time was a quadratic function of temperature. *T. elegans* can parasitize greater numbers of hosts within the temperature range of 26℃ to 29℃.

Key words: *Theocolax elegans*; *Sitophilus oryzae*; temperature; biological control; functional response

米象 *Sitophilus oryzae* (L.)是一种重要的储粮害虫,在世界多数国家和地区均有分布。成虫主要取食胚乳部分,导致粮食中碳水化合物的含量降低;幼虫喜欢在寄主内蛀食胚,严重影响粮食中的蛋白质和维生素水平。研究证实,米象是分布最广泛、最具破坏性的储粮害虫之一,其取食危害会导致粮食的重量、品质、商业价值和种子萌芽率的显著降低(Lucas and Riudavets, 2002;Park *et al*., 2003)。

雅脊金小蜂 *Theocolax elegans* (Westwood, 1874),又称雅俑小蜂(姚康,1986),是仓储害虫米象的优势天敌,在米象的自然控制中发挥着重要的作用。该蜂为世界性分布,寄主包括当前重要的鞘翅

基金项目:广东省科技攻关项目"主要储粮害虫综合治理关键新技术研究"(20041320501009);广州市科技攻关项目"寄生蜂对重要储粮害虫的持续控制作用研究"(2006J1-C0241)

作者简介:高燕,女,1977 年 10 月生,博士研究生,研究方向为农产品安全生产与检测,E-mail:beauty-gaoyan@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail:xuzaifu@scau.edu.cn

收稿日期 Received:2005-09-26;接受日期 Accepted:2006-04-13

目和鳞翅目仓贮害虫的幼虫和蛹，单寄生（Goodrich，1921；Williams *et al*.，1971；Sharifi，1972；Burks，1979；姚康，1986；Bouček，1988；Flinn *et al*.，1996；Helbig，1998；高燕等，2004）。该蜂对环境友好、不会污染粮食、对人畜安全、对米象的寄生率高，与米象的种群数量消长趋势基本一致，有明显的伴随现象，但一般比米象的种群稍滞后（Wen and Brower，1995）。

雅脊金小蜂对储粮害虫种群的控制作用会受到很多生态因子的影响。有关该蜂的生态学国外已经有一些研究（Loosjes，1957；van den Assem and Kuenen，1958；Sharifi，1972；Almeida and Matioli，1984；Toews *et al*.，2001；Flinn Hagstrum，2002），但主要集中在温度对该蜂搜索行为和功能反应的影响。例如，此蜂对谷蠹的寄生率和瞬间搜索率都在30℃时最高，在20℃时最低；处理时间与温度成反比，20℃时最低，30℃时最高（Flinn，*et al*.，2002）。但未见雅脊金小蜂寄生米象时的功能反应报道。为此，我们开展了雅脊金小蜂在一系列温度梯度下，寄生米象4龄幼虫时的功能反应实验，结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 供试小麦粒

小麦粒为硬质灰白色，购自广州市五山菜场。实验前先将小麦粒置于阳光下曝晒6～8 h，以杀死或驱赶麦粒中自然侵入的害虫及其天敌。在室温下放置1天后，调整小麦含水量至12%左右，供实验用。

1.2 供试虫源

米象 *S. oryzae*（L.）由广东省粮食科学研究所曾伶高级工程师提供，在实验室内用小麦粒繁殖、续代。

雅脊金小蜂 *T. elegans*（Westwood，1874）由广东省粮食科学研究所曾伶高级工程师提供的被寄生的米象中育出，用试管单个收集，以4龄米象幼虫供其寄生繁殖、续代。小蜂饲养在纸箱内遮光进行，温度25℃±0.5℃，相对湿度65%±5%。

1.3 实验方法

将含有米象4龄幼虫的小麦粒用水浸泡，4～5 h后，于显微镜下挑出含4龄米象幼虫的麦粒，晾干后做好标记备用。分别将含有4龄幼虫的1、2、4、8、16、32和64粒小麦粒放入装有60 g无虫小麦粒的养虫盒（200 mL）内，混匀；将1头羽化不久的长翅型雌蜂接入养虫盒中；24 h后，挑出标记的小麦粒，放在29℃的人工气候箱（PXY-300Q-B）中饲养，待雅脊金小蜂全部羽化后，记录该蜂刺死寄主数和寄生数。实验分设6个温度处理，温度分别是17℃±0.5℃、20℃±0.5℃、23℃±0.5℃、26℃±0.5℃、29℃±0.5℃和32℃±0.5℃，相对湿度65%±5%。全部实验是在纸箱内遮光进行。每处理5次重复。

1.4 功能反应方程

（1）搜索率和处理时间的计算（Royama，1971）

$$N_p = N_t\{1 - \exp\{-\frac{aTP_t}{1 + aT_hT_t}\}\}$$

其中 N_p 为被寄生的寄主数量，N_t 为寄主密度，a 为雅脊金小蜂寄主搜索率，T 为寄生蜂释放时间，P_t 为释放的寄生蜂数量，T_h 为寄生蜂处理寄主时间。

（2）温度调节的功能反应模型（Flinn，1991）

$$N_p = N_t\{1 - \exp\{-\frac{aTP_t}{1 + a(B_0 - B_1X + B_2X^2)N_t}\}\}$$

其中 X 为温度梯度，其余参数同上。

1.5 数据处理

本论文中的数据统计均采用SAS（8.1版本）软件（非线性回归分析、牛顿迭代法）进行处理（洪楠等，2001）。

2 结果与分析

2.1 雅脊金小蜂的功能反应

表1和图1为温度和寄主密度对雅脊金小蜂寄生的影响。由表1和图1可以看出，Royama（1971）的寄生蜂随机搜索方程能很好地拟合米象幼虫密度和雅脊金小蜂对米象幼虫的寄生关系。

在各个温度梯度下，雅脊金小蜂对米象4龄幼虫的寄生数都随着米象幼虫密度的增加而增加。但是，由于雅脊金小蜂个体间的寄生数差异很大，导致了 r^2 的降低。对米象幼虫密度和被寄生的米象幼虫数做回归分析，所有实验温度下的结果都显著（$P < 0.0001$）。温度不同，雅脊金小蜂的寄主搜索率和寄主处理时间也不同。26℃时，寄生蜂寄主搜索率最高，为1.521；其次为29℃和32℃，寄主搜索率分别为1.406和0.900；在17℃时，寄主搜索率最低，仅为0.083。

寄生蜂对寄主的处理时间最长发生在17℃，达0.333天；其次为20℃，处理时间是0.259天；在29℃时，寄主处理时间最短，仅为0.063天。预测的雅脊金小蜂对米象幼虫的最大寄生数（$1/T_h$）在29℃时最高，为15.9头/天；其次为26℃和32℃，最大寄

生数分别是 9.4 头/天和 9.2 头/天；而在 17℃时，最大寄生数最低，仅为 3.0 头/天。由此可见，26℃～32℃是寄生蜂的最适寄生温度范围。

表 1 雅脊金小蜂的功能反应

Table 1 Functional response of *Theocolax elegans* to the rice weevil larvae at different temperatures

温度 Temperature (℃)	搜索率 Search rate (a) (d^{-1})	处理时间 Handling time (T_h) (d)	r^2	P	每天最大寄生数 Maximal number of hosts parasitized per day
17	0.083 ± 0.056	0.333 ± 0.191	0.35	< 0.0001	3.0
20	0.156 ± 0.120	0.259 ± 0.157	0.23	< 0.0001	3.9
23	0.346 ± 0.194	0.156 ± 0.050	0.43	< 0.0001	6.4
26	1.521 ± 1.046	0.106 ± 0.019	0.58	< 0.0001	9.4
29	1.406 ± 0.382	0.063 ± 0.013	0.69	< 0.0001	15.9
32	0.900 ± 0.977	0.109 ± 0.020	0.53	< 0.0001	9.2

注：表中搜索率和处理时间是平均值 ± 标准误，下同。

Notes: Search rate and handling time are mean ± *SE*, and the same below.

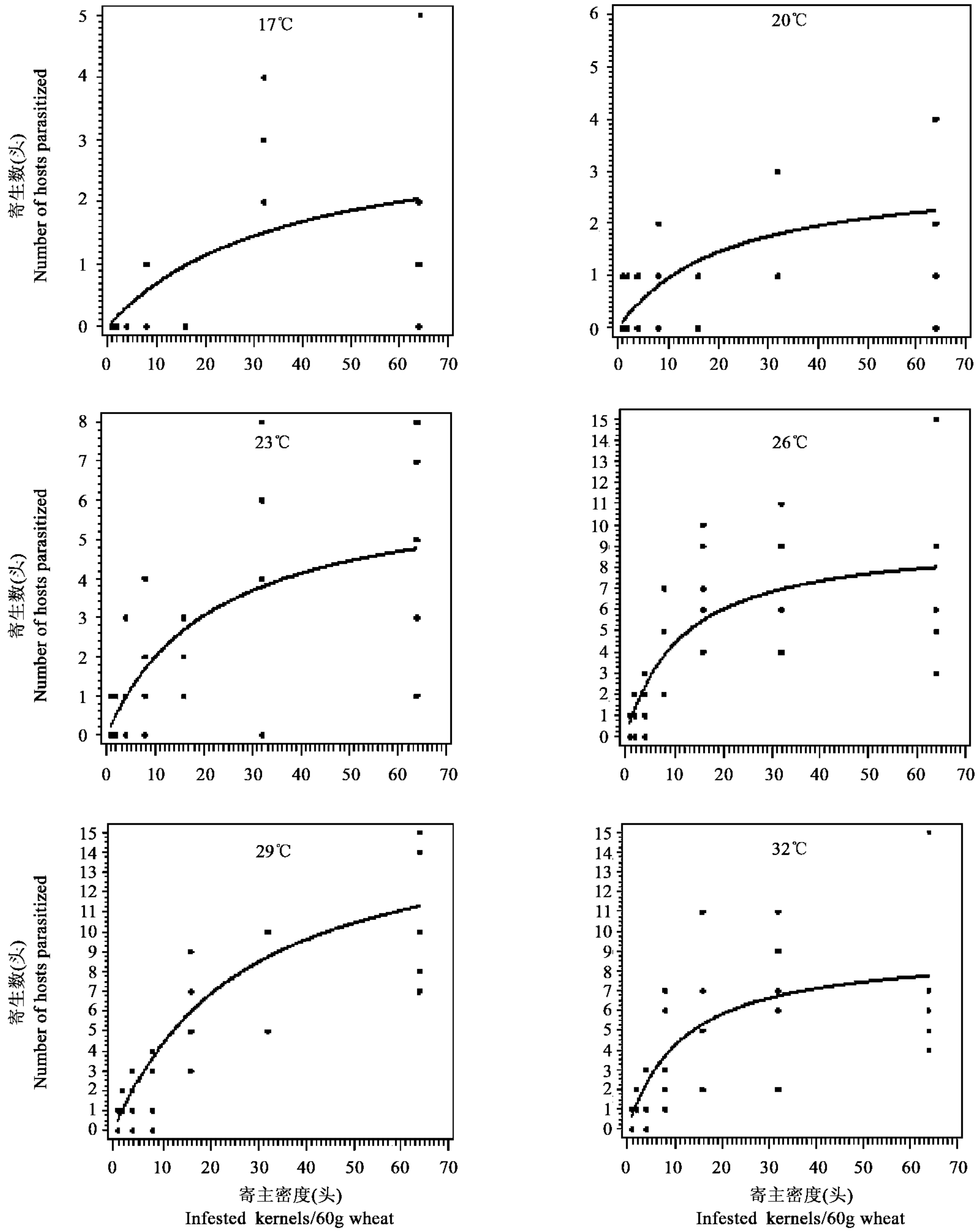

图 1 雅脊金小蜂在不同温度下的功能反应

Fig. 1 Functional response of *Theocolax elegans* to the rice weevil larvae at different temperature

2.2 温度和寄主密度对雅脊金小蜂刺死米象幼虫的影响

表 2 和图 2 为温度和寄主密度对雅脊金小蜂刺死米象幼虫数的影响。

表 2 温度和寄主密度对寄生蜂刺死寄主数的影响

Table 2 Effect of temperature and host density on host-feeding of *Theocolax elegans*

温度 Temperature (℃)	搜索率 Search rate (a) (d^{-1})	处理时间 Handling time (T_h) (d)	r^2	P	每天最大刺死数 Maximal number of hsots paralyzed per day
17	0.138 ± 0.086	0.068 ± 0.015	0.80	< 0.0001	14.7
20	0.263 ± 0.050	0.030 ± 0.013	0.88	< 0.0001	33.3
23	0.428 ± 0.072	0.023 ± 0.001	0.67	< 0.0001	43.5
26	1.033 ± 0.415	0.012 ± 0.012	0.75	< 0.0001	83.3
29	0.569 ± 0.059	0.008 ± 0.004	0.80	< 0.0001	125.0
32	0.506 ± 0.060	0.017 ± 0.009	0.79	< 0.0001	58.8

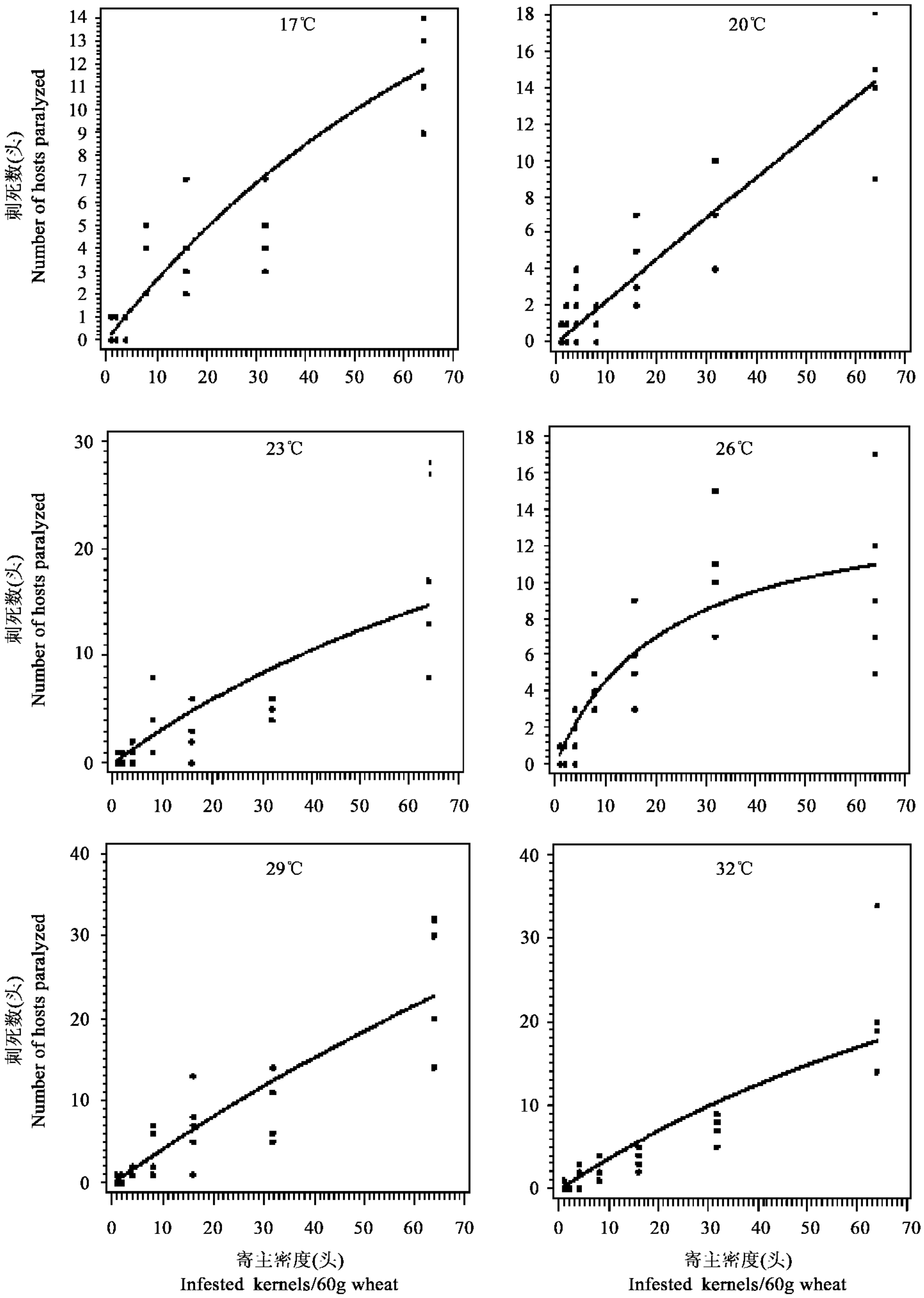

图 2 雅脊金小蜂在不同温度下的刺死寄主数

Fig. 2 The number of hosts paralyzed by host-feeding of *Theocolax elegans* to the rice weevil larvae at different temperature

由此可以看出,在各个温度梯度下,雅脊金小蜂对米象 4 龄幼虫的刺死数都随着米象幼虫密度的增加而增多,但是雅脊金小蜂个体间的刺死数差异不显著。对米象幼虫密度和雅脊金小蜂刺死米象幼虫数做回归分析,所有温度下结果都显著($P < 0.0001$)。

温度不同,雅脊金小蜂对米象的搜索率和处理时间也不同。26℃时,该蜂寄主搜索率最高,为 1.033;其次为 29℃和 32℃,寄主搜索率分别为 0.569 和 0.506;而 17℃时,寄主搜索率最低,仅为 0.138。可见,在 17℃~26℃的温度范围内,随着温度升高,寄主搜索率提高。雅脊金小蜂刺死寄主的处理时间最长发生在 17℃,为 0.068 天;而 29℃时,刺死寄主所需时间最短,仅为 0.008 天。可见,在 17℃~29℃的温度范围内,随着温度升高,雅脊金小蜂刺死寄主所需时间缩短。预测的寄生蜂对米象幼虫的最大刺死数,在 29℃时最高,为 125.0 头/天。

2.3 温度和寄主密度对雅脊金小蜂总致死米象幼虫的影响

表 3 为米象幼虫的密度和温度对雅脊金小蜂总致死米象幼虫个体数的影响。由表 3 和图 1、图 2 可以看出,在各个温度梯度下,雅脊金小蜂对米象 4 龄幼虫的总致死数也都随着寄主幼虫密度增加而增多,但是寄生蜂个体间的总致死数差异不显著。对寄主密度和寄生蜂总致死寄主数做回归分析,所有温度下的结果都显著($P < 0.0001$)。

温度不同,寄生蜂的寄主搜索率和处理时间也不同。26℃时,寄生蜂寄主搜索率最高,为 1.667;其次为 29℃,搜索率为 1.421;而 17℃时,寄主搜索率最低,仅为 0.339。可见,在 17℃~26℃的温度范围内,随着温度升高,寄主搜索率提高。寄生蜂杀死寄主的处理时间最长发生在 17℃,为 0.039 天;其次为 20℃,处理时间是 0.032 天;而 29℃时,杀死寄主的时间最短,仅为 0.008 天。可见,在 17℃~29℃的范围内,随着温度升高,寄生蜂蜂杀死寄主所需时间缩短。预测的寄生蜂对米象幼虫的最大总致死数在 29℃时最高,为 125.0 头/天;其次为 32℃时,最大总致死数是 111.1 头/天;而在 17℃时,最大总致死数最低,仅为 25.6 头/天。

表 3 温度和寄主密度对雅脊金小蜂总致死寄主数的影响

Table 3 The effect of temperature and host density on number of hosts killed by *Theocolax elegans*

温度 Temperature (℃)	搜索率 Search rate (a) (d^{-1})	处理时间 Handling time (T_h) (d)	r^2	P	每天最大总致死数 Maximal number of hosts killed per day
17	0.339 ± 0.117	0.039 ± 0.011	0.84	< 0.0001	25.6
20	0.450 ± 0.086	0.032 ± 0.008	0.89	< 0.0001	31.3
23	0.829 ± 0.161	0.025 ± 0.015	0.72	< 0.0001	40.0
26	1.667 ± 0.789	0.019 ± 0.007	0.80	< 0.0001	52.6
29	1.421 ± 0.443	0.008 ± 0.004	0.89	< 0.0001	125.0
32	0.872 ± 0.281	0.009 ± 0.007	0.81	< 0.0001	111.1

2.4 雅脊金小蜂温度调节的功能反应

图 3 为雅脊金小蜂在 17℃~32℃的温度梯度下的功能反应预测模型。a,B_0,B_1 和 B_2 的预测值分别是:0.97 ± 0.23,3.824 ± 0.587,− 0.260 ± 0.041 和 0.004 ± 0.007。可以看出,Flinn(1991)的温度调节的功能反应模型能很好的拟合寄主密度和温度对雅脊金小蜂寄生率的影响($r^2 = 0.64$,$P < 0.001$)。29℃时,雅脊金小蜂的寄生率最高;其次为 32℃和 26℃;而 17℃时寄生率最低。可见,在 17℃~29℃的温度范围内,随着温度升高,寄生率增加。另外,随着寄主密度增加,雅脊金小蜂的寄生率也增加。

3 讨论

温度和寄主密度都会影响寄生蜂的寄主搜索率,相关的功能反应模型已经有人对其他寄生蜂做过报道(Solomon,1949;Mack *et al*.,1981;Flinn,1991)。相对于瓦氏头肿腿蜂 *Cephalonomia waterstoni* (Gahan)和象虫金小蜂 *Anisopteromalus calandrae* (Howard)来说,雅脊金小蜂的最适寄生温度范围较窄(Flinn and Hagstrum,2001)。在 23℃、26℃、29℃和 32℃范围内,雅脊金小蜂的最大平均寄生数较高,分别为 6.4、9.4、15.9 和 9.2 头/天;而在 17℃和 20℃时,该蜂的最大平均寄生个体数仅为 3.0 头/天

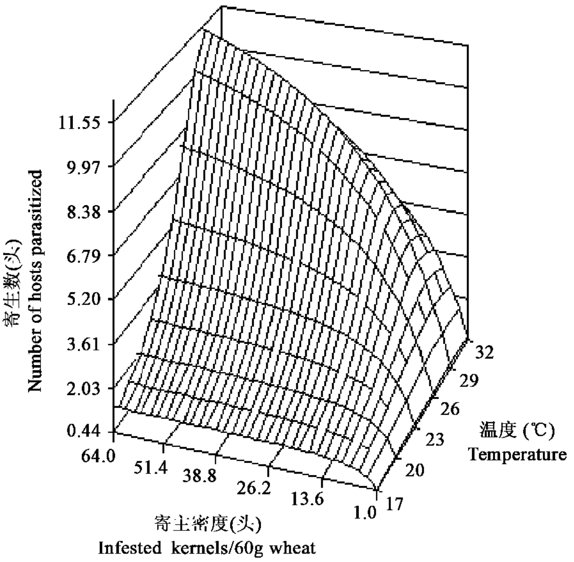

图 3　雅脊金小蜂温度调节的功能反应

Fig. 3　Temperature-mediated functional response of *Theocolax elegans* to 4th instar larvae of the rice weevil at different temperatures

和 3.9 头/天。较短的寄主处理时间意味着寄生蜂可以在单位时间内发现更多的寄主，从而提高寄生率。29℃时，寄生蜂的寄主处理时间最短，为 0.063 天；而在 17℃时，寄生蜂的寄主处理时间最长，达 0.333 天。同时，在各个实验温度下，雅脊金小蜂对米象 4 龄幼虫的寄生数都随着寄主密度增加而提高。这似乎表明，雅脊金小蜂在较高的温度(26℃ ~ 32℃)和适当的寄主密度(32 头/60g ~ 64 头/60g)时，寄生量会提高。

寄生蜂的寄主取食行为具有非常重要的意义。因为这不但可以直接杀死寄主，还可以为寄生蜂提供生长发育所需的必要营养，即补充营养。有时，寄生蜂通过取食而杀死的寄主甚至比寄生杀死的寄主还多(Flinn，1991)。通过雅脊金小蜂自由搜索模型拟合的最大刺死数为 125.0 头/天，而最大寄生数仅为 15.9 头/天。

寄生蜂通过寄主取食和寄生都可以杀死寄主。29℃时，寄生蜂每天最大总致死寄主数最大，为 125.0 头，其次为 32℃，为 111.1 头。这似乎也可以表明，在 26℃ ~ 29℃的温度条件下，雅脊金小蜂对米象的控制效果会更好。温度调节的功能反应模型也证实在 17℃ ~ 29℃范围内，随着温度和寄主密度升高，寄生蜂的寄生率增加。

因此，为了充分发挥雅脊金小蜂控制储粮害虫的效能，在寄生蜂释放前，可将粮温通过通风等手段降到 26℃ ~ 30℃。因为 26℃和 32℃相比，不但寄生蜂的功能反应差别不大，而且此时储粮害虫的发育速率几乎减为一半(Flinn and Hagstrum，2002)。

致谢　在实验过程中，广东省粮食科学研究所曾伶高级工程师对实验材料的提供给予了支持，本校植物保护专业 2002 级本科生张馨文同学对实验给予了帮助，在此表示感谢。

参 考 文 献 (References)

Almeida AA，Matioli JC，1984. Ocorrencia de *Choetospila elegans* Westwood，1874 (Hymenoptera：Pteromalidae) como parasito de *Sitophilus oryzae* (L. 1763) (Coleoptera：Curculionidae). *Annals of the Entomological Society of Brazil*，13：107 – 115.

Bouček Z，1988. Australasian Chalcidoidea. CAB International.

Burks DB，1979. Family Pteromalidae. In：Krombein V，Hurd PD，Smith DR，Burks DB eds. Catalog of Hymenoptera in America North of Mexico. Smithsonian Institute，Washington，DC. 768 – 834.

Flinn PW，1991. Temperature-dependent functional response of the parasitoid *Cephalonomia waterstoni* (Gahan) (Hymenoptera：Bethylidae) attacking rusty grain beetle larvae (Coleoptera：Cucujidae). *Environmental Entomology*，20：872 – 876.

Flinn PW，Hagstrum DW，2001. Augmentative release of parasitoid wasps in stored wheat reduces insect fragments in flour. *Journal of Stored Products Research*，37：179 – 186.

Flinn PW，Hagstrum DW，2002. Temperature-mediated functional response of *Theocolax elegans* (Hymenoptera：Pteromalidae) parasitizing *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera：Bostrichidae) in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*，38：185 – 190.

Flinn PW，Hagstrum DW，Mcgaughey WH，1996. Suppression of beetles in stored wheat by augmentative release of parasitic wasps. *Environmental Entomology*，25(2)：505 – 511.

Gao Y，Pang JM，Zeng L，Xu ZF，2004. *Theocolax elegans* (Westwood，1874) (Hymenoptera：Pteromalidae)：a new record on parasitoid of stored-product pests in China. *Natural Enemies of Insects*，26(3)：122 – 125. [高燕，庞建梅，曾伶，许再福. 2004. 雅脊金小蜂——我国仓储害虫寄生蜂的新记录. 昆虫天敌，26(3)：122 – 125]

Goodrich WS，1921. Note on the Hymenoptera Parasitic on Beetles Infesting Grain. Report of the Grain Pest Committee of the Royal Society of London. 9：5 – 7.

Helbig J，1998. Ability of naturally occurring parasitoids to suppress the introduced pest Prostephanus truncates (Horn) (Coleoptera：Bostrichidae) in traditional maize stores in Togo. *Journal of Stored Products Research*，34(4)：287 – 295.

Hong N，Hou J，2001. The System Tutorial of SAS for Windows on Statistics and Analysis. Beijing：Publishing House of Electronics Industry. [洪楠，候军，2001. SAS for windows 统计分析系统教程. 北京：电子工业出版社]

Loosjes FE，1957. Ervaringen met *Choetospila elegans* (Westwood) (Hymenoptera：Pteromalidae)，een parasite van enige soorten voorraadinsecten. *Entomol. Ber. Amsterdam*，17：74 – 76.

Lucas E, Riudavets J, 2002. Biological control and mechanical control of *Sitophilus oryzae* by *Lariophagus distinguendus* and *Anisopteromalus calandrae*. *Journal of Stored Product Research*, 38: 293 – 304.

Mack TP, Bajusz BA, Nolan ES, Smilowitz Z, 1981. Development of a temperature-mediated functional response equation. *Environmental Entomology*, 10: 573 – 579.

Park IK, Lee SG, Choi DH, Park JD, Ahn YJ, 2003. Insecticidal activities of constituents identified in the essential oil from leaves of *Chamaecyparis obtusa* against *Callosobruchus chinensis* (L.) and *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Stored Products Research*, 39(4): 375 – 384.

Royama T, 1971. A comparative study of models for predation and parasitism. *Researches on Population Ecology*, 1: 1 – 91.

Sharifi S, 1972. Radiographic studies of the parasite *Choetospila elegans* on the maize weevil, *Sitophilus zeamais*. *Annals of the Entomological Society of America*, 65: 852 – 856.

Solomon ME, 1949. The natural control of animal populations. *Journal of Animal Ecology*, 18: 1 – 35.

Toews MD, Phillips TW, Cuperus GW, 2001. Effects of wheat cultivar and temperature on suppression of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) by the parasitoid *Theocolax elegans* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Biological Control*, 21: 120 – 127.

van den Assem J, Kuenen DJ, 1958. Host finding of *Choetospila elegans* Westwood (Hymenoptera: Chalciodoidea) a parasite of *Sitophilus granaries* L. (Coleoptera: Curculionidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1: 174 – 180.

Wen B, Brower JH, 1995. Competition between *Anisopteromalus calandrae* and *Theocolax elegans* (Hymenoptera: Pteromalidae) at different parasitoid densities on immature rice weevils (Coleoptera: Curculionidae) in wheat. *Biological Control*, 5: 151 – 157.

Williams RN, Floyd EH, 1971. Effect of low temperatures on hymenopterous parasites *Theocolax elegans* and *Anisopteromalus calandrae* of the maize weevil. *Journal of Economic Entomology*, 64: 1 438 – 1 439.

Yao K, 1986. The Stored-Product Insect Pests and Natural Enemies. Beijing: China Financial and Economic Publishing House. [姚康, 1986. 仓库害虫及益虫. 北京:中国财政经济出版社]

(责任编辑:袁德成)